УДК 553.311

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ СТРУКТУР ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЗОЛОТОНОСНЫХ ПЛОЩАДЕЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО АЛДАНА

В.Г. Ворошилов, Г.Ю. Боярко

Томский политехнический университет
E-mail: lev@tpu.ru

Предложена методика количественной оценки аномальных структур геохимических полей. На основе разработанных показателей проведена типизация аномальных геохимических полей золоторудных месторождений Центрального Алдана. На примере объектов рябиновского типа показаны возможности методики для оценки их промышленной значимости.

Золоторудная минерализация Центрального Алдана генетически связана с мезозойским этапом активизации Алданского щита. Оруденение сопровождается комплексом элементов-спутников золота (Cu, Pb, Zn, Ag, As, Bi, Tl, Mo, Ba, Mn, Ni, V, Ti, Be, W, Se, Te, U), формирующих в первичных и вторичных геохимических полях обширные аномальные структуры. По характеру локализации рудных тел и особенностям их морфологии в районе выделяется пять основных геолого-промышленных типов золоторудных месторождений: рябиновский, самолазовский, лебединский, куранахский, эльконский.

Оруденение рябиновского (золото-порфирового) типа локализовано внутри сложных по составу многофазных щелочных массивов и представлено следующими последовательно сформированными ассоциациями: 1) площадные кварц-гематит-мусковит-ортоклазовые метасоматиты; 2) околорудные серицит-адуляр-микроклиновые метасоматиты с вкрапленностью слабо золотоносного пирита; 3) золото-пирит-микроклиновая ассоциация; 4) золото-полисульфидная минерализация с кварцем и кальцитом; 5) позднерудная молибденит-кварцевая и галенит-кварцевая прожилковая минерализация [1, 2]. Золото ассоциирует, в основном, с пиритом двух генераций, в меньшей мере – с сульфидами меди, борнитом и халькопиритом.

Самолазовский тип представлен субгоризонтальными залежами и зонами прожилково-вкрапленной минерализации сульфидно-флюорит-полевошпат-кварцевого состава. Из сульфидов, количество которых обычно не превышает 5 %, развит, в основном, пирит, реже – галенит, халькопирит. Характерной особенностью оруденения рассматриваемого типа является его приуроченность к приконтактовой зоне штокообразных массивов сиенит-граносиенитов лебединского комплекса. При этом рудные залежи локализуются в скарнах, а прожилково-вкрапленная минерализация приурочена к зонам тектонических нарушений внутри интрузивных пород [3].

К оруденению лебединского типа относят рудные тела в виде крутопадающих жил и горизонтальных залежей, приуроченные к низам доломитовой толщи венда, вблизи контакта с архейским кристаллическим фундаментом. Некоторые рудные тела локализованы непосредственно в фундаменте. Оруденение пространственно сопряжено с участками развития штоков, силлов и даек сиенитов, сиенит-порфиров, лампрофиров, пластовыми залежами кварцевых порфиров. Руды представлены кварцево-сульфидным агрегатом с содержанием сульфидов 20...40 %. Среди последних преобладают пирит, пирротин, халькопирит, галенит. Кроме сульфидов обычно присутствует гематит, из нерудных, помимо кварца, широко развиты анкерит, тремолит. Всего в лебединских рудах выявлено около 80 минералов и выделяется 4 типа руд: анкерит-пирит-кварцевый, гематит-пирит-кварцевый, пирит-кварцевый и кварц-полисульфидный [2].

Оруденение куранахского типа приурочено к контактовой зоне нижнекембрийских карбонатных и нижнеюрских терригенных пород. В доюрское время на поверхности кембрийских отложений сформировалась мощная кора выветривания с интенсивным ожелезнением, выщелачиванием и дезинтеграцией первичных пород. В период мезозойской активизации толща была разбита разрывами, произошло внедрение послеюрских даек минетт и бостонитов, широко проявился метасоматоз. Золотое оруденение локализовано в метасоматитах кварц-калишпатового состава, развивавшихся вдоль контакта толщ, как по карбонатным породам, так и по песчаникам, а частично и вдоль даек. Выделяется два типа метасоматитов: существенно калишпатовые и существенно кварцевые (джаспероиды). Главные минералы руд – характерный рисовидный кварц, пирит и лимонит, образовавшийся по пириту. Количество последнего колеблется в пределах 1...10 %, но иногда достигает 50...60 %. Обычны также флюорит, мусковит, арагонит, гидрослюды. Из рудных минералов встречаются халькопирит, пирротин, арсенопирит, галенит, сфалерит, самородное золото, серебро, висмут. В рудах и первичных ореолах, помимо золота, выявлены повышенные концентрации Ag, As, Cu, Mo, Pb, Zn, W, Se, Te [2].

К эльконскому типу относят золото-урановую минерализацию в омоложенных тектонических швах кристаллического фундамента. Оруденение представлено превращенными в милониты и катаклазиты калишпатизированными архейскими гранитами. Золото, в основном, свободное, содержание сульфидов не превышает первых процентов [4]. Ввиду высокого содержания урана, подобные зоны легко обнаруживаются радиометрическими методами,

поэтому специализированных литогеохимических поисков на этих территориях не проводилось и нами этот тип оруденения ниже не рассматривается.

Перечисленные типы месторождений сопровождаются сходным набором химических элементов, но имеют свои особенности строения аномальных структур геохимического поля (АСГП), морфологические аспекты которых описаны нами ранее [5–9]. В настоящей статье рассматриваются методика и результаты количественной оценки параметров АСГП для четырех основных геолого-промышленных типов золотого оруденения. Необходимость использования предлагаемой методики обусловлена тем, что классический способ оценивания геохимических ореолов, основанный на расчете их продуктивности по основному элементу, по отношению к золоту применим далеко не всегда. Ввиду исключительно сложного поведения золота в ореолах и потоках рассеяния, более объективную информацию о возможных масштабах и параметрах оруденения нередко несут многоэлементные комплексные аномалии, рассматриваемые нами с позиций их структурной иерархии. Как было показано нами в процитированных работах, наиболее объективную картину внутреннего строения АСГП дают методы группирования переменных (в частности, R-метод факторного анализа), поскольку в результатах такого анализа отражаются не интегральные геохимические спектры (как в методах кластеризации наблюдений), а конкретные ассоциации элементов и интенсивность их проявления. Поэтому соотношение факторов имеет важное значение для расшифровки генезиса геохимической зональности.

Поскольку факторный анализ предполагает вычисление значений факторов путем перемножения факторных коэффициентов на концентрации элементов, нормированные на среднее содержание по выборке, диапазон колебаний вычисляемых величин по всем выборкам получается примерно одинаковым, со средним значением равным нулю. В таких условиях количественные сравнения отдельных объектов между собой теряют смысл. Поэтому стандартная процедура факторного анализа модернизирована нами таким образом, что при вычислении значений факторов используются не нормированные содержания элементов, а их кларки концентраций (КК). Матрица факторных коэффициентов вычисляется при этом на эталонном объекте. В итоге мы не только можем визуально сравнивать морфологию аномальных структур, получаемых без влияния субъективного фактора, но и количественно оценивать продуктивность каждой геохимической ассоциации в КК·м^2. Последняя процедура легко реализуется в общедоступных компьютерных программах (Surfer, ArcView и т.п.).

Поскольку для разных типов месторождений матрицы факторных нагрузок несколько различаются, на рис. 1 мы приводим продуктивность для групп элементов, которые входят в состав ведущих ассоциаций на всех месторождениях: Au+Ag+Cu+Pb, Ba+Mn.

Стандартизованная количественная информация отражена также в коэффициентах относительной концентрации (ОК) родственных элементов [10]. Значения этих показателей растут по мере эволюции магматических и рудно-метасоматических систем, поэтому взаимное расположение и количественные соотношения аномалий ОК несут ценную информацию о генезисе и возможных параметрах рудоносных структур. Масштабы аномалий ОК при этом тоже оцениваются через их продуктивность в условных единицах (усл. ед. м^2).

Интенсивность перераспределения вещества по периферии рудоносных структур, тесно связанная с собственно рудным процессом, отражается в значениях индекса центробежности (ИЦ), вычисляемого как отношение суммы содержаний центробежных и дефицитно центробежных элементов к сумме содержаний центростремительных и минимально центробежных элементов [11]: ИЦ=(Ba+Pb+Mo+Bi)/(Cu+Ag+Zn+Co+Ni+Au). Все содержания выражаются в *КК*.

Прямым количественным индикатором интенсивности геохимических процессов является показатель энергии рудообразования [12]: $E=\Sigma[KK_i \cdot \ln(KK_i)]$.

На рис. 1 приводятся результаты количественного моделирования вторичных геохимических полей с использованием названных показателей и продуктивности ореолов по золоту. Количественная типизация первичных геохимических полей является темой отдельного сообщения и нами здесь не рассматривается.

Анализ приведенных данных показывает, что каждый из рассматриваемых типов месторождений характеризуется своими диапазонами колебаний рассчитанных параметров. В масштабах рудных полей, от рябиновского типа к куранахскому (по мере удаления от энергетического источника) происходит снижение продуктивности ИЦ (в 50 раз), ОК Co:Ni (в 30 раз), Ba+Mn (в 10 раз), возрастание продуктивности Au+Ag (в 5...10 раз). В АСГП ранга месторождений эта тенденция сохраняется.

Показательно, что внутри выделенных групп месторождений существует достаточно контрастная дифференциация промышленных и непромышленных объектов по ряду показателей: по *E* – в 2...40 раз, по ИЦ – в 7...30 раз, по ОК Ag:Au – в 2...10 раз, по ОК Pb: Zn – в 10...25 раз, по Au+Ag – в 5...7 раз, по Ba+Mn – в 3...5 раз. Наименее информативным показателем является продуктивность по золоту. По этому параметру площади с непромышленной минерализацией либо не отличаются от известных рудных полей, либо даже превосходят их. В АСГП ранга месторождений информативность аномалий золота значительно возрастает, а показателя ОК Pb:Zn – убывает практически до нуля, сохраняясь лишь для месторождений рябиновского типа. Показатель Ba+Mn отражает закономерное накопление этих элементов в контактовой зоне интрузий. Соответсвенно, наиболее важное значение он имеет для месторождений самолазовс-

Геолого-промышленный тип месторождений	Продуктивность показателей, n×10^6							
	у.е.·м²					КК·м²		
	E	ИЦ	ОК			Au	Au+Ag+Pb+Cu	Ba+Mn
			Co:Ni	Pb:Zn	Ag:Au			
Ранг рудных полей								
Рябиновский	400...10000* / 10000...18000	30...500 / 500...1000	150...220 / 220...300	50...2000 / 500...1000	3...10 / 10...30	50...120 / 50...120	160...270 / 270...330	1...15 / 3...8
Самолазовский	100...200 / 200...300	20...50 / 50...200	10...15 / 15...20	100...1000 / 300...500	200...300 / 300...500	5...50 / 5...30	250...450 / 450...1100	5...15 / 15...30
Лебединский	100...200 / 200...500	1...5 / 5...30	5...7 / 7...10	10...3000 / 400...1500	50...100 / 100...300	100...400 / 100...400	300...450 / 450...1300	0,05...5 / 0,05...5
Куранахский	100...200 / 200...1000	0,1...1 / 1...15	2...4 / 4...8	10...3000 / 300...2000		100...400 / 100...400	200...320 / 320...1000	0,05...5 / 0,05...5
Ранг месторождений								
Рябиновский	100...1000 / 1000...2000	10...40 / 40...100	5...10 / 10...30	0,1...10 / 10...35	0,5...1 / 1...2	0,1...15 / 8...50	5...50 / 10...70	0,1...0,5 / 0,5...1
Самолазовский	10...60 / 60...150	1...20 / 20...100	0,4...3 / 3...6	10...60 / 10...60	0,01...0,1 / 0,1...0,3	2...4 / 4...10	8...25 / 25...85	1...3 / 3...5
Лебединский	50...70 / 70...150	0,5...3 / 3...15	0,2...0,8 / 0,8...3	10...60 / 10...60	3...4 / 4...7	8...15 / 15...40	10...20 / 20...60	0...0,05 / 0,05...0,2
Куранахский	50...80 / 80...300	0,1...0,5 / 0,5...10	0,05...0,3 / 0,3...1	10...60 / 10...60	1...2 / 2...3	8...15 / 15...40	10...15 / 15...55	0...0,05 / 0,05...0,1
Информативность показателя**	0.25 / 0.80	0.50 / 0.80	0.70 / 0.80	0.20 / 0.20	0.50 / 0.70	0.10 / 0.25	0.15 / 0.80	0.75 / 0.70
Шкала значений	10, 100, 500, 1000, 10000	0.1, 1, 10, 100, 1000	0.1, 1, 10, 100, 300	1, 10, 100, 1000, 3000	0.1, 1, 10, 100, 500	0.1, 1, 10, 100, 500	1, 10, 100, 300, 500, 1000	0, 0.1, 1, 10, 50

1 2 3

* - диапазон значений показателя для территорий: числитель - с непромышленной минерализацией, знаменатель - с промышленным оруденением;

** - числитель - для идентификации геолого-промышленного типа месторождения, знаменатель - для оценки промышленной значимости объекта.

Рис. 1. *Количественная типизация аномальных структур вторичных геохимических полей золоторудных месторождений Центрального Алдана: 1–3) интервалы значений параметров для объектов: 1) с непромышленной минерализацией; 2) с промышленным оруденением; 3) с промышленной и непромышленной минерализацией*

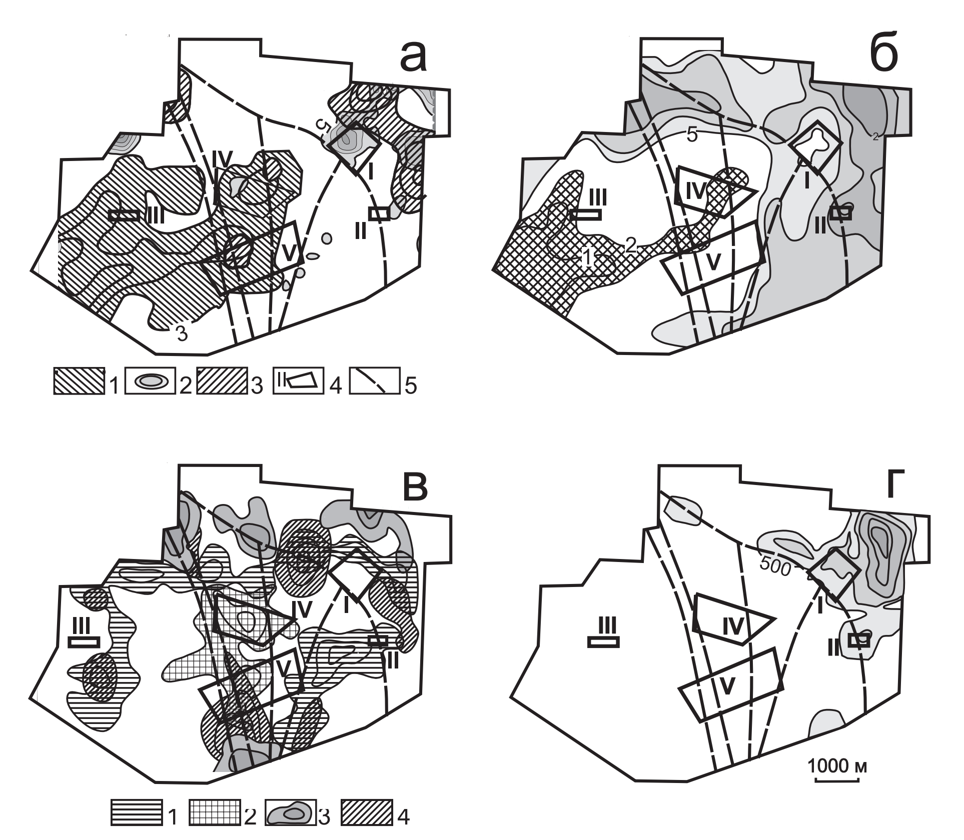


Рис. 2. Структура аномального геохимического поля Рябинового массива: а) изолинии значений факторов: 1) фактор 1 (Cu, Co, Ni, Zn); 2) фактор 2 (Au, As, Ag); 3) фактор 3 (Pb, Nb, Mo, Ag, Zn); 4) контуры рудных участков: I, II — месторождения Мусковитовое и Новое; III, IV, V — непромышленные рудопроявления; 5) разрывные нарушения б)изолинии значений индекса центробежности ИЦ; в)изолинии значений коэффициентов относительной концентрации: 1) ОК Co:Ni, 2) ОК Cu:Ni, 3) ОК Pb:Zn, 4) ОК Ag:Au; г) изолинии значений показателя энергии рудообразования

кого и рябиновского типов. В последнем случае его можно использовать для оценки эрозионного среза рудных полей: если значение параметра менее 3, срез нижнерудный, если более 8 – можно предполагать надрудный срез.

Количественная типизация АСГП золоторудных месторождений Центрального Алдана сопровождается экспертной оценкой информативности каждого из расчетных показателей, которая отражает контрастность их изменения от одного типа месторождений к другому и от промышленных объектов к непромышленным.

Ниже, в таблице, приводится пример оценки промышленной значимости АСГП для объектов рябиновского типа. Соответствие каждого показателя промышленному эталону оценивается при этом по трехбалльной шкале: 0 – 0,5 – 1.

Следует заметить, что наличие четко проявленной зональной структуры является одним из характерных признаков объектов с промышленным оруденением, поэтому нам представляется целесообразным ввести дополнительный коэффициент, учитывающий морфологию АСГП ($К_{морф.}$). Предлагается три градации этого параметра: 2 – ясно выраженные концентрически-зональные АСГП, 1 – комплексные аномалии с пространственно совмещенными ассоциациями рудных элементов, 0,5 – территории с разобщенными аномалиями рудных элементов, во взаимном расположении которых не устанавливается четкой закономерности. Коэффициент применяется к сумме баллов перспективности территории по вышеперечисленным параметрам (таблица). Итоговый показатель, индекс промышленной значимости (ИПЗ), является основанием для разбраковки аномальных геохимических структур. Его значения для промышленных объектов могут колебаться в пределах от 5,0 до 9,9.

В качестве эталонного промышленного объекта рябиновского типа в ранге рудного поля нами выбран Рябиновый массив, включающий в себя золото-порфировые месторождения Мусковитовое и Новое и ряд рудопроявлений. В качестве примера объекта с непромышленной минерализацией рассмотрено геохимическое поле Перевального массива, аналогичного Рябиновому.

Аномальная структура вторичного геохимического поля Рябинового массива имеет отчетливое концентрическое строение с обособлением трех зон: ядерной, промежуточной и фронтальной (рис. 2). Для *ядерной* зоны характерна типоморфная ассоциация коррелирующихся элементов Cu, Co, Ni, Zn (фактор № 1), минимальные значения индекса центробежности (ИЦ<2), невысокий уровень энергии рудообразования (50<*E*<200), максималь-

Таблица. *Пример оценки промышленной значимости АСГП рябиновского типа по геохимическим данным*

Объект	Продуктивность, $n \cdot 10^6$								Сумма баллов S	$K_{морф.}$	ИПЗ= $S \cdot K_{морф.}$
	усл. ед.·м^2					КК·м^2					
	E	ИЦ	ОК			Au	Au+Ag+Pb+Cu	Ba+Mn			
			Co:Ni	Pb:Zn	Ag:Au						
Рябиновый массив	18000 (1·0,8)	1115 (1·0,8)	285 (1·0,8)	1000 (1·0,2)	30 (1·0,7)	113 (0,5·0,25)	403 (1·0,7)	4.8 (0,5·0,7)	4,48	2,0	8,96
Перевальный массив	397 (0·0,8)	36 (0·0,8)	183 (0·0,8)	53 (0·0,2)	3.5 (0·0,7)	57 (0,5·0,25)	260 (0·0,7)	10 (0,5·0,7)	0,48	1,0	0,48
Мусковитовое месторождение	2100 (1·0.8)	101 (1·0,8)	28 (1·0,8)	34 (1·0,2)	1.8 (0,5·0,7)	38 (1·0,25)	67 (1·0,7)	0.9 (1·0,7)	4,60	2,0	9,20
Новое месторождение	1124 (1·0.8)	48 (1·0,8)	12 (1·0,8)	2 (0,5·0,2)	0,9 (0,5·0,7)	9 (0,5·0,25)	17 (0,5·0,7)	0.7 (1·0,7)	4,02	2,0	8,04
Рудопроявление III	35 (0·0.8)	7 (0·0,8)	10 (0·0,8)	1 (0·0,2)	1.0 (0,5·0,7)	0,1 (0,5·0,25)	8 (0·0,7)	0.3 (0·0,7)	0,35	2,0	0,70
Рудопроявление IV	129 (0·0.8)	9 (0·0,8)	9 (0·0,8)	0.1 (0·0,2)	0.9 (0,5·0,7)	11 (0,5·0,25)	33 (0,5·0,7)	0.1 (0·0,7)	0,82	1,0	0,82
Рудопроявление V	423 (0·0.8)	30 (0·0,8)	10 (0·0,8)	12 (0,5·0,2)	2.0 (0,5·0,7)	5 (0,5·0,25)	45 (0,5·0,7)	0.4 (0·0,7)	0,80	0,5	0,40

Примечание: в скобках указаны значения коэффициента соответствия объекта промышленному эталону, умноженные на информативность показателя

ные значения ОК Cu:Ni и минимальные – ОК Pb:Zn. *Промежуточная* зона отмечается пониженными концентрациями всех элементов, значениями показателя ИЦ от 2 до 5, минимальными значениями энергии рудообразования (E<50). Для *фронтальной* зоны характерны максимальные значения ИЦ (>5), E (>200), ОК Pb:Zn (>400) и ОК Ag:Au (>70). Типоморфными для этой зоны являются две геохимических ассоциации: Au, As, Ag и Pb, Nb, Mo, Ag, Zn. Первая из них фиксирует золоторудные месторождения, вторая – связана с поздснерудной галенит-молибденитовой минерализацией. Оба известных месторождения локализованы во фронтальной зоне АСГП, в ядерной зоне выявлены рудопроявления III, IV, V, в промежуточной зоне известны только точки минерализации.

В пределах Перевального массива зональность проявлена значительно слабее, обычным является пространственное совмещение ассоциаций, причем большая часть аномалий локализуется за пределами массива, где развита минерализация лебединского типа. Внутри массива промышленной минерализации рябиновского типа не выявлено. Соответственно, вычисленные параметры АСГП соответствуют объекту рябиновского типа, но с низкой промышленной значимостью (таблица). В то же время, по высокому значению показателя Ba+Mn можно предполагать надрудный срез рудоносной системы рябиновского типа.

Среди АСГП ранга месторождений резко выделяются участки Мусковитовый и Новый по значениям показателей, связанных с параметрами интенсивности энергетического источника: E, ИЦ, ОК Co:Ni, Ba+Mn. Концентрическая зональность, кроме этих участков, проявлена также на рудопроявлении III, но низкие значения всех количественных показателей свидетельствуют либо о слабом проявлении рудного процесса, либо о нижнерудном срезе объекта. Рудопроявления IV и V отличаются достаточно высокими значениями некоторых параметров, характеризующих привнос Au, Ag, Pb, Cu, но отсутствие ясно выраженной зональности снижает вероятность выявления объектов с концентрированным оруденением, что находит отражение и в низких значениях показателей E, ИЦ, Ba+Mn.

Заключение

1. Предложена методика анализа структуры геохимического поля золотоносных территорий, включающая следующие процедуры:
   а) геометризация АСГП;
   б) вычисление продуктивности расчетных показателей в контурах АСГП;
   в) идентификация геолого-промышленного типа оруденения и оценка промышленной значимости объекта с использованием предварительно созданной базы данных по эталонным месторождениям.
2. На основе разработанной методики созданы эталонные модели АСГП основных геолого-промышленных типов золоторудных месторождений Центрального Алдана и проведена их количественная типизация.
3. На примере рябиновского геолого-промышленного типа показаны возможности предлагаемой методики для оценки промышленной значимости рудоносных объектов по геохимическим данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочетков А.Я. Молибден-медно-золото-порфировое месторождение Рябиновое // Отечественная геология. – 1993. – № 7. – С. 50–58.
2. Ветлужских В.Г., Ким А.А. Геолого-промышленные типы золоторудных месторождений Южной Якутии // Отечественная геология. – 1997. – № 1. – С. 16–24.
3. Гусев В.Н., Элюев В.К., Боярко Г.Ю. Самолазовское золотоскарновое месторождение (Центральный Алдан) // Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых Сибири: Матер. научной конф. – Томск: ТПУ, 2000. – С. 108–117.
4. Бойцов А.Е., Пилипенко Г.Н. Золото и уран в мезозойских гидротермальных месторождениях Центрального Алдана (Россия) // Геология рудных месторождений. – 1998. – Т. 40. – № 4. – С. 354–369.
5. Ворошилов В.Г., Боярко Г.Ю. О закономерностях размещения золотого оруденения в тектонических швах // Руды и металлы. – 2001. – № 5. – С. 61–63.
6. Ворошилов В.Г., Боярко Г.Ю. Структура аномального геохимического поля золото-порфирового оруденения Рябинового массива (Центральный Алдан) // Прикладная геохимия. Выпуск. 3. Прогноз и поиск. – М.: ИМГРЭ, 2002. – С. 171–177.
7. Ворошилов В.Г., Боярко Г.Ю. Особенности геохимической зональности месторождений самолазовского типа (Центральный Алдан) // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 191–197.
8. Ворошилов В.Г., Боярко Г.Ю., Бирюков Е.И. Геохимическая зональность месторождений лебединского типа // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 3. – С. 43–46.
9. Ворошилов В.Г. Методика выявления структуры аномальных геохимических полей рудных месторождений // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 55–61.
10. Щербаков Ю.Г. Геохимические индикаторы золоторудных полей // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36. – № 9. – С. 42–52.
11. Силаев В.И., Цой В.Д., Федчишина Э.Б. Отражение геологического строения рудоносных территорий в неоднородности аномальных геохимических полей // Геология и геофизика. – 1990. – Т. 31. – № 11. – С. 39–49.
12. Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. – Л.: Недра, 1978. – 265 с.

УДК 552.578.2.42:553.982(571.16)